学士論文

エンドミル加工時の加工熱による歪みの測定

1p-40p　ページ　完

平成 18 年 2 月 3 日提出

指導教官　 長尾 高明 教授

1060180　 森田真司

目次

1. 緒言

2. 加工の知能化

3. 構成

4. 実験器具の製作

5. 実験

6. 考察

7. 結論

第 1 章

緒言

1.1　研究の背景

人類はこの地球上に誕生してから暮らしを豊かにするために様々な物を開発してきた。そして、物作りのシステムが大幅に変わる出来事がイギリスで起こった。それは、産業革命だ。それまで人類は手作業で製品を作ってきたが、機械の誕生で作業の効率があがり、大量に生産できるようになった。しかし、マザーマシンの誕生で高水準の生産性や信頼性が要求されるようになった。

一昔前までは、高水準の製品を生産するには熟練者でなくては作れなかったが、汎用工作機械から NC 化された工作機械が開発されたことによりマニュアルやプログラムを学ぶだけである程度の物は精度よく製品を生産できるようになった。しかし、高い精度が要求される加工については、熟練者の経験がまだまだ必要だということが未だ変わらない。

今現在、日本は戦後始まって以来の大不況で今まで日本を支えてきた、町工場が次々と潰れてきている。その原因として人件費の安い中国に目をつけた国内外企業が工場を作り加工を受注し、その結果近年中国が力をつけ、ある程度の加工が出来るようになり日本の仕事を取るようになったことが要因だと考えられる。人件費に打ち勝つことのできない日本が、中国の加工産業に打ち勝つためには、加工精度を上げていくしか打開策が見出せない。では、加工精度を向上させるにはどうすれば良いのだろうか。

加工精度の要求が高まる中で、工作機械が熱や加工反力によって変形し高精度加工ができないというのが実情だ。

実際、変形による精度の低下を抑えるためにファンを使い機械を冷やしながら加工を行ったり、技術者が変形を考慮して加工したり、数時間工作機械を空運転させて変形を安定させてから加工を行うことしか精度を上げる手段がない。しかし、全ての変形を考慮することはできない。

そこで私は薄肉部材を加工する時に部材自体が変形、たわみを起こすことが容易に予想できるので温度変化と歪みを測定した。

1.2　一般の工場で行われている精度向上のための作業

工作機械を運転すると、主軸回転速度、早送り繰り返し頻度、切削油剤の使用状況、照明の当て加減、その運転状況と室内の温度、温度変化の度合いによって機械に変形が起こり加工に誤差が生じる。

短時間の加工による誤差は微小だが、長時間かかる加工では、加工位置間の寸法や機械原点とテーブル上の基準との距離に誤差が生じ、それは無視することはできない量になる。

熱変形は、同じ運動状態でも室内環境の違い、季節などによって誤差が数 10μになることがある。また、発熱置と遠い部分との変形時間の誤差が生まれるという問題も発生する。

ウォーミングアップでの精度向上

大阪機工㈱VM４－Ⅱは、ソフトスケールの採用により、無負荷運転に対する熱変形補正を行いますが、出勤してから冷え切った機械を 100%フル起動させるとねじの伸びや主軸の変位が急激な変化を生じるため、補正に遅れが生じることがある。

この遅れを防ぐ為に、運転時に予めウォーミングアップすることで変形させておけば加工開始時点からの変形が少なくなりソフトスケールの効果もより有効的に作用できる。

主軸回転のウォーミングアップ

主軸軸受けのなじみを良くするために、30 分程度慣らし運転を行う。回転速度と時間の関係は下表に示す。

表 1.1 標準仕様機（6000min^{-1}）

主軸回転速度（min-1）	時間（min-1）
5000	5
2000	10
4000	10
6000	5

1.3　従来の研究

工作機械の精度を下げる要因のうち、熱変形の占める割合が大きい古くから知られていた。以来、熱変形の要因を調べる研究がなされてきた。現在では、機械本体の熱変形挙動を解析する研究などもある。

まだ、熱変形に対して加工精度の向上を目指す研究も多くある。それらは大きく２つに分類でき。１つは熱変形を抑制する研究、もう１つは熱変形による制度低下に対し補正を行う研究である。

前者には熱伝導率の小さい材料を構造部に用いて熱変形を抑えようとする研究などがある。後者の例として、熱変形を直接的に計測するための変形センサと、その情報に基づいて変形を補正するための熱アクチュエーターを装備した工作機械を用いた研究がある。

本研究においても前者の例のように、熱伝導率の小さい材料を構造部に用いて熱変形を抑えようとする。その小さな材料がどれほど変形するのか、熱電対によって直接的に計測した温度情報を基に材料がどれほど歪むかという加工を行う研究を行ってきた。

第 2 章

加工の知能化

2.1　加工の知能化の基本概念

加工の目的は所望の寸法をもつ製品をできるだけ正確に効率良く創り出すことである。しかし、実際に「正確に」、「効率良く」を実現することは非常に困難である。なぜなら、図 2.1.1 に示す様に加工中に様々な物理現象が生じているからである
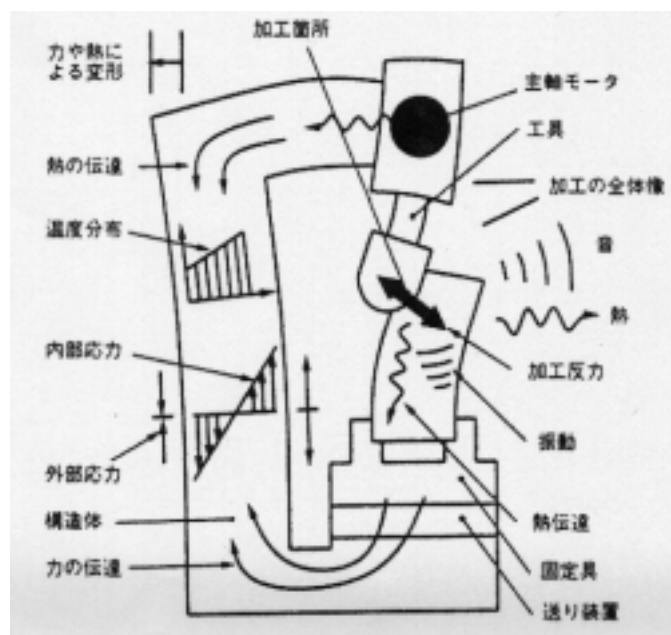
図 2.1.1　加工中に生じる物理現象

マシニングセンタを始めとする工作機械はこれらの物理現象によって生じる力と熱によって変形し、同時に歪み、温度、音などの情報を発生する。そこで、これらの情報をセンサによって取り込み、設計に関する知識に基づいて処理することで目標値と実際とのズレを予測し修正することが出切れば製品を正確に造り出すことが可能になる。また、センサ情報、アクチュエーターの動作内容、加工結果をベース化し、それに基づいて予測するための内部モデルを修正することで、システム自体が学習、自己進化することも可能である。この様な考えを「加工の知能化」という。また、これらを考慮に入れて材料を加工していってもマシニングセンタの材料を加工する部分（今回はエンドミル）にはどうしても摩擦熱などが影響してくる。それによって、材料が熱変形してしまい、ずれが生じてしまう。それによって本来造るべき物とは違う寸法の物ができてしまい、後の事故などに繋がる。これらを防ぐためにどのくらいの温度で歪みが生じるかを測定してみた。

2.2　マシニングセンタにおける熱変形補償の意義

前述したように加工中には様々な物理現象が生じているが、マシニングセンタの加工精度を低下させる大きな要因として、加工反力による変形、熱による変形、材料側の要因はエンドミルによる摩擦熱による変形、加工中のマシニングセンタによる振動などが挙げられる。

このうちこのうち加工反力による変形に対して、工作機械本体の剛体を高めることで変形を抑える方法が取られてきた。

また、もう一つの要因として挙げたマシニングセンタの熱による変形に対しては、従来は発熱部を冷やす、あるいは熱が他の部分に伝わるのを出来るだけ抑制する、といった対策を施すことで少しでも変形を軽減しようとしてきたが、発生した熱を全て冷却することが出来ない以上、わずか 2 時間で 40～50μm もの主軸変位が発生する。

実際には、主軸モータの発熱に加え、工具と被加工物との間に生じる加工熱、周囲の全て取り除くことは不可能である。

またマシニングセンタの様に多数の部品と複雑な構造で構成されるものでは、加工反力による変形と熱による変形を具体的に解析し、モデル化することは非常に困難である。よってモデル化による熱変形補正は複雑な熱変形を十分に補正出来ない。

そこで本研究では、加工中の部材について解析しようと考えた。加工中の部材の熱変形が少なくなればこれらの問題は軽減され、加工物の精度は上がる。エンドミルによる加工熱と部材の歪みがどのくらいなのかを解析していくことを試みる。

第 3 章

構成

3.1　マシニングセンタ

本研究に用いた高精密マシニングセンタの外観及びその仕様を示す。

図 3.1　高精密マシニングセンタの外観

このマシニングセンタは、大阪機工㈱製の VM4－Ⅱという機種のマシニングセンタに加工の知能化を実現すために特殊な機構を装備したものである。

その機構とは以下の様なものである。

- コラム下部に熱アクチュエータ（加熱、冷却用各 14 箇所）を装備しており、熱変形に対してアクティブな補正が可能である。
- 主軸頭部に 2 本、コラム部に 4 本の変形船センサが取り付けられており、マシニングセンタの変形状態をリアルに監視できる。

表 3.1　高精密マシニングセンタの仕様

テーブル作業面	800 × 400mm
最大移動距離 　テーブル左右　(x) 　サドル(前後)　 (y) 　ヘッド（上下)　(z)	 630mm 410mm 460mm
切削送り速度	1 ～10000 mm/min
早送り速度	24m/min (x,y) 12m/min (z)
主軸回転数 　指令方式	25～6000rpm S5 桁
主軸オーバーライド	50～150%

・　外部制御装置からマシニングセンタの各種機能が仕様できる。

・　テーブルには XY 軸フェイルセイフ機構が設けられており、過大な荷重に対して非常停止をかけることでマシニングセンタを守る。

・　オープン CNC マシニングセンタであり、インターネットに繋がっているので遠隔操作が可能である。

3.2　変形検出機構

3.2.1 システムの概略

図 3.2.1 に変形量検出システムの概略を示す。
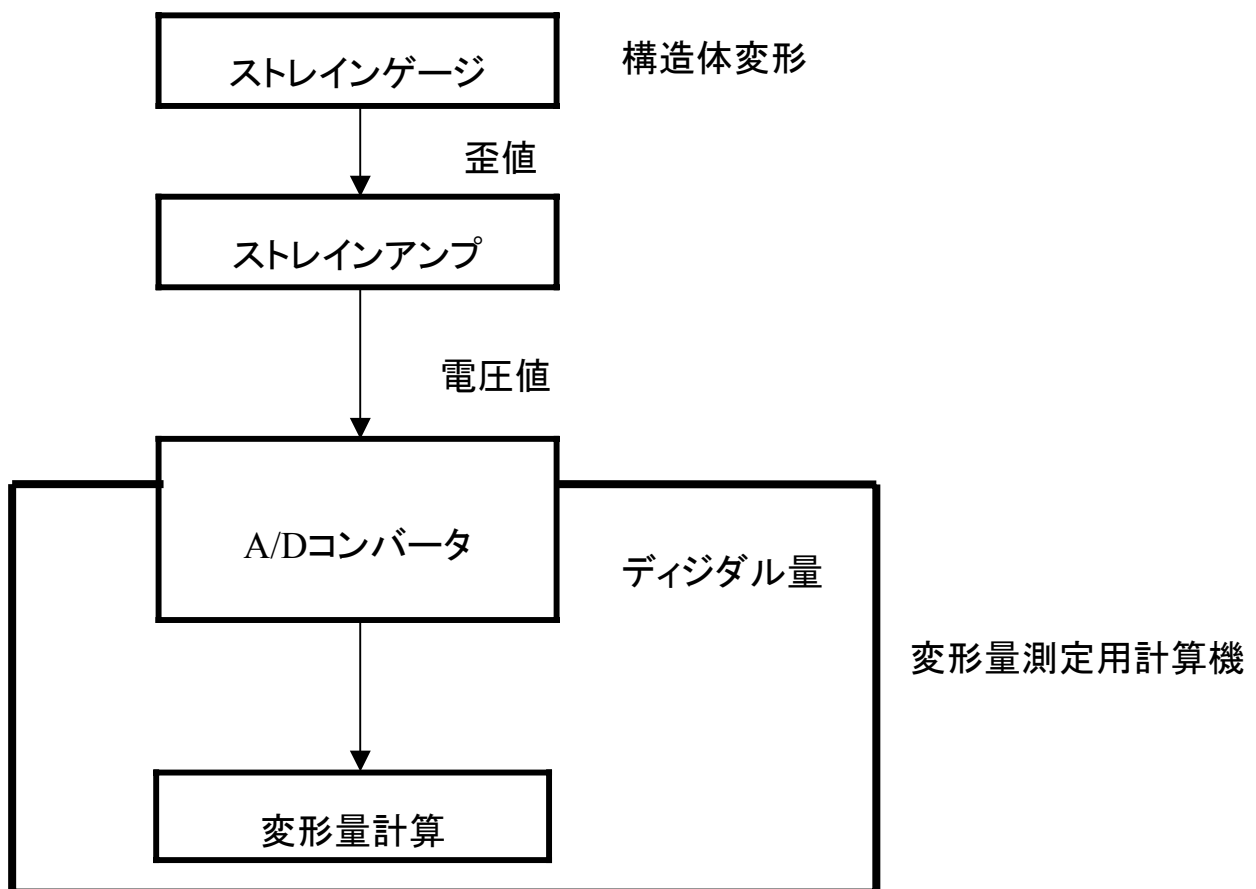
図 3.2.1　変形量検出システム

3.3 ストレインアンプ、ストレインゲージ

図 3.3.2 に示すのは日本電気三栄㈱製ストレインアンプ（動歪測定器）である。これはリモートコントロールアンプ（AH1100 の AH1108 形）に交流電源形ストレインアンプユニット（AH11-104）を 6 チャンネル収納したものである。本研究では、これを用いて 6 本の変形センサの歪みゲージ出力を増幅し、各センサの較正データからセンサ位置での実際の歪み量を計算する。表 3.2.1 にその仕様を示す。

図 3.3.1

表 3.3.1　ストレインアンプの仕様

型番	日本電気三栄㈱製 AH11-104
適用ゲージ抵抗	120Ω～1kΩ
ブリッジ電源	2V,0.5Vrms　内部切り替え 正弦波　25kHz
平衡調整方式	抵抗分自動バランス バックアップ約 1 ヶ月 （容量分自動除去機能付き）
平衡調整範囲	抵抗偏差値　±約 2%　（±約 10000×10-6 ひずみ）
電圧感度	200×10-6 ひずみ入力にて 5V 以上（VAR 最大）
自動平衡精度・時間	200×10-6 ひずみ入力換算値以内 0.5 秒以内 （測定範囲 200×10-6 ひずみ,VAR 最大,BV=2V）
測定範囲	200,500,1k,2k,5k,×10-6 ひずみ/FS,OFF （VAR 最大,BV=2V）
ローパスフィルタ	2 ポートバターワース型 ＤＣ～10,30,100,300,1k,3kHz
非直線性	±0.2%/FS 以内
内部校正器	±100,±200,±500,±1k,±2k,3k×10-6 ひずみ 精度　±0.5%/FS 以内
周波数特有	DC～10kHz±10%

表 3.3.2 ストレインゲージの仕様

型番	共和電業㈱製 KFR-2-120-C1-16
温度補償	ステンレス
ゲージ長	2mm
ゲージ抵抗（24℃相対温度 50%）	120.0±0.6Ω
ゲージ率（24℃,相対湿度 50%）	1.99±1.5%
適合線膨張係数	16.6PPM/℃
横感度（24℃,相対湿度 50%）	ditto%/℃

歪み検出には、2 倍の検出量を得ることができ、且つ回路上で温度補償が可能である 2 ゲージ 2 アクティブ法を採用した。

3.3　多点集計装置（データロガー）

熱電対からの出力を集計するために図 2.7 に示す多点集計装置（以下データロガー）を用いた。合計 16 チャンネルの入力が可能である。このデータロガーは USB と PC カードを介して外部コンピュータと通信を行うことができる。データロガーの仕様を表 3.3.1 に示す。

図 3.3.1　データロガー

表 3.3.1　データロガーの仕様

型式	(株)キーエンス　NR-1000
熱電対入力	K 熱電対：－200～1300℃
入力インピーダンス	1MΩ以上
精度	K 熱電対：±(0.05%of rdg＋1℃)
分解能	16bit
サンプリング周期	0.1sec～24h
時間軸精度	±100ppm
使用周囲温度	0～＋50℃
使用周囲湿度	20～85%RH(結露しないこと)
ウォームアップ時間	データ収集後 30 分

3.4　赤外放射温度計

今回、赤外線放射温度計は小スポット型（IT2-02）を用いて実験を行った。

測定視野/距離

スポット径と同程度の大きさの測定対象物の場合、測定対象物の大きさと、測定部先端から測定対象物までの距離が一定であれば、比較温度測定が適応される。

正確な温度を求める場合は、測定対象物の大きさがスポット径の 2 倍以上になるように距離を決める。

視準方法

測定箇所が赤色の LED 発光素子により照射される。照射される赤色のマークが最も小さくなるところが最小スポット径の位置になり、対象物に光沢がある場合には照射位置が認めにくいことがあり、今回のアルミ部材の場合には周囲温度よりも高い（または低い）場合、測定部分の方向を変え、指示が最大（または最小）になったとき、最良の視準を得る。

図 3.4.1

図 3.4.2

表 3.4.1 赤外線放射温度計の使用

測定部分類	小スポット型
型式（測定部）	IT2-02
型式（コントローラ部）	IT2-50
測定温度範囲	0～500℃
最小スポット径	Φ1.2mm
測定距離	54mm±4mm
照準	赤色 LED マーカー式
検出素子	サーモパイル
検知波長	6～12μm
表示分解能	0.1℃
測定精度	±1%of F.S.
再現性	±0.5℃以内
放射率補正範囲	0.10～1.00（0.01 ステップ）
応答時間（表示、制御出力）	0.5 秒以内
応答時間（アナログ電圧出力）	0.7 秒以内（95%応答にて）
サンプリング周期	約 0.2 秒
制御出力（アラーム出力）	NPN オープンコレクタ　最大 100mA（30V 以下）×2
アナログ電圧出力	0-1V　出力インピーダンス 100Ω

第 4 章

実験器具の製作

4.1 薄肉アルミ部材の加工

アルミ部材（120×120×30ｍｍ）をフライスで図 4.1.1 のように加工する。詳細な寸法は図 4.1.2 に記載する。また作成するときに使ったプログラムも記載する。
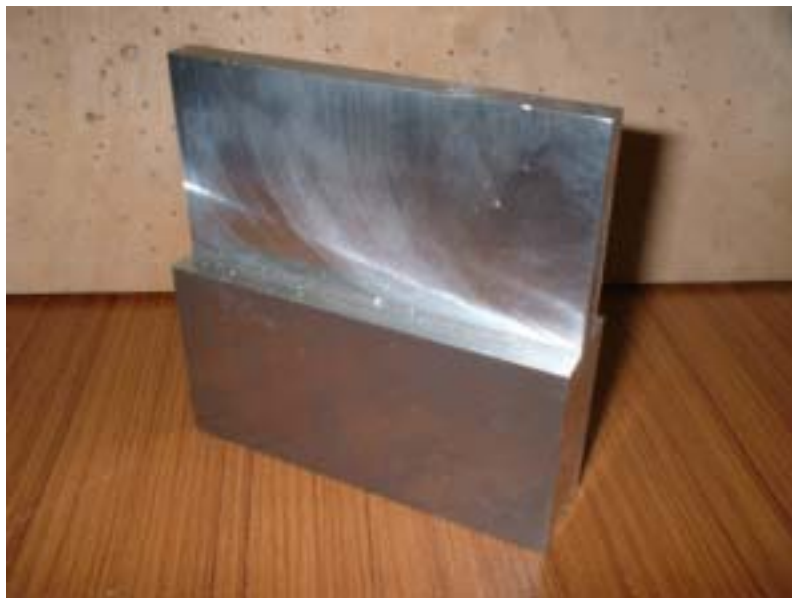
図 4.1.1　薄肉アルミ部材
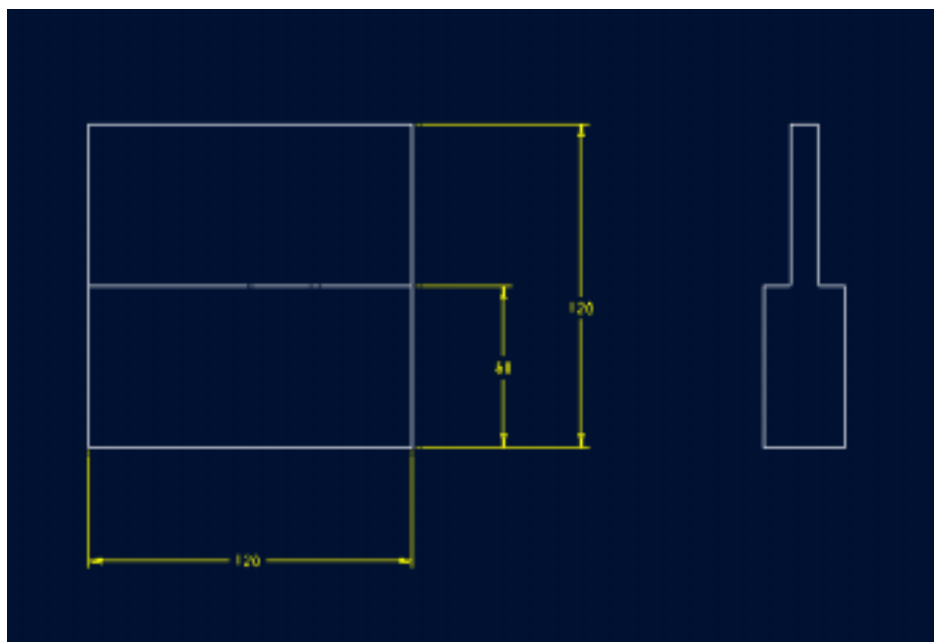
図 4.1.2　薄肉アルミ部材の寸法

アルミ部材製作プログラム

```
O0820 (FRAISE);
G90　G54　F20；
G00　 X90.　Y60.；
G43　Z150.　H20;
S2000　M03；
Z86.；
G01　Y210；
G00　Z50.；
G01　X180.；
G00　Z54.7；
G01　X-60.;
G00　Z54.4；
G01　X180；
G00　Z54.1；
G01　X-60.;
G00　Z53.8；
G01　X180.；
G00　Z53.5；；
G01　X-60.;
G00　Z53.2；；
G01　X180.；
G00　Z52.9；
G01　X-60.;
G00　Z52.6；
G01　X180.；
G00　Z52.3；
G01　X-60.;
G00　Z52.；
G01　X180.；
G00　Z51.7；
G01　X-60.;
G00　Z51.4；
G01　X180.；
G00　Z51.1；
G01　X-60.;
G00　Z50.8；
G01　X180.；
G00　Z50.5；
G01　X-60.;
G00　Z50.2；
G01　X180.；
G00　Z49.9；
G01　X-60.;
G00　Z49.6；
G01　X180.；
G00　Z49.3；
G01　X-60.;
G00　Z49.；
G01　X180.；
G00　Z48.7；
G01　X-60.;
G00　Z48.4；
G01　X180.；
G00　Z48.1；
G01　X-60.;
G00　Z47.8；
G01　X180.；
G00　Z47.5；
G01　X-60.;
G00　Z47.2；
G01　X180.；
G00　Z46.9；
```

```
G01　X-60.;
G00　Z46.6 ;
G01　X180. ;
G00　Z46.3 ;
G01　X-60.;
G00　Z46. ;
G01　X180. ;
G00　Z45.7 ;
G01　X-60.;
G00　Z45.4 ;
G01　X180. ;
G00　Z45.1 ;
G01　X-60.;
G00　Z45. ;
G01　X180. ;
G00　Z70.　M09;
G91　G28　X0.　Y0.　Z0. ;
M30;
%
```

4.2　ストレインゲージによる歪みの測定

4.1 にて作成した薄肉アルミ部材にストレインゲージを図 4.2.1 及び図 4.2.2 のように固定し、ストレインアンプに繋げるように端子を半田にて固定する。
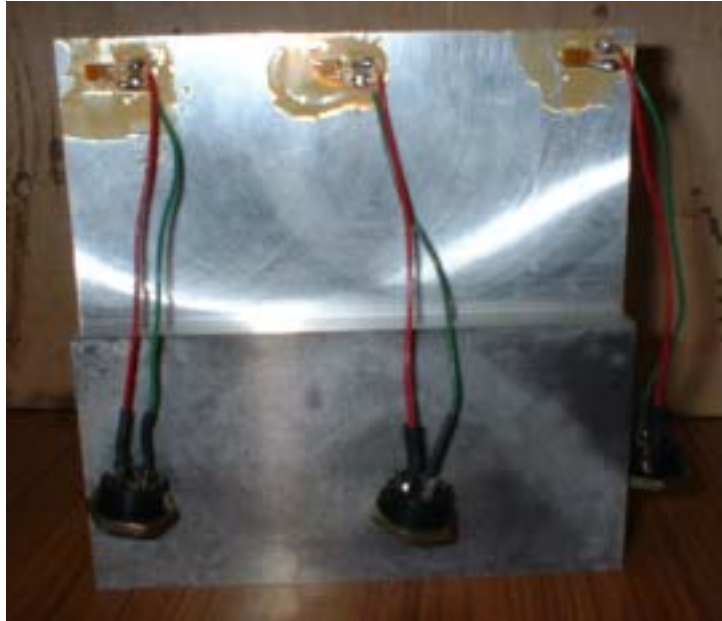
図 4.2.1　ストレインゲージ横 3 連
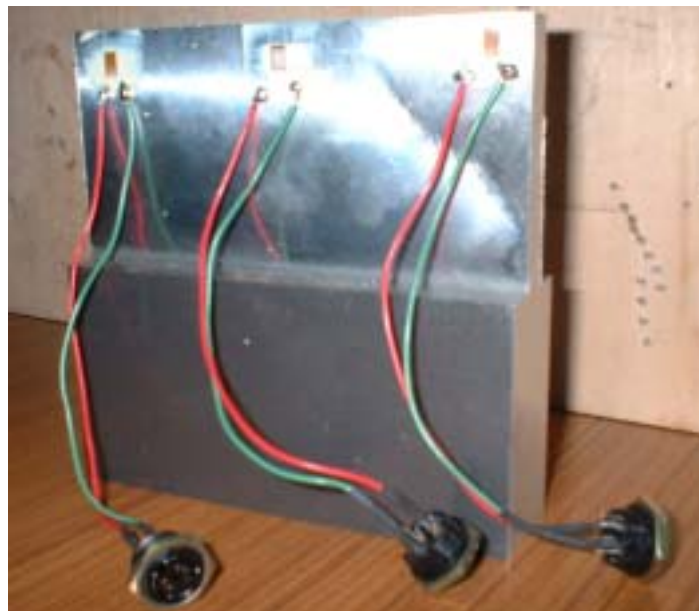
図 4.2.2　ストレインゲージ縦 3 連

4.3　赤外放射温度計による温度測定

マシニングセンタの切削時に動く場所に取り付けて、アルミ部材を削っている直後の場所の温度を測定したい。そのためにはエンドミルの真横を測定できるよう場所を探さなければならない。

始めに考え付いたのは、図 4.3.1 のようにアルミ部材の手前部分を横に削って、赤外放射温度計をマシニングセンタの奥へ向けて測定するという方法。しかし、この方法では赤外線温度計の計測する部分が少し凹んでいて、その部分に切粉が溜まり、毎回測定が終わるたびに凹んでいる部分を掃除しなければ正確なデータが取れないという問題が出てくる。また測定中にも切粉が溜まり途中でデータがおかしくなるといった状況も出てきた。このため、他の取り付け方法を考えなければならない。

図 4.3.1　コラムの前方に固定した赤外放射温度計

次に考えた方法は図 4.3.2 のように赤外放射温度計を奥から手前に向けて設置すると言った方法、この方法をすることにより、測定毎に温度計の掃除が楽になり、また掃除が楽になるということは設置場所がずれにくくなるといった点がありこの方法を用いて実験を継続した。また、温度計の先を少し下に向けることにより加工中に切粉が凹んでいる部分に溜まりにくくなり、正確なデータが取れるようになった

図 4.3.2　コラムの後方に固定した赤外放射温度計

4.4　熱電対による温度測定

4.1 の薄肉アルミ部材にΦ2.5ｍｍ、深さ 6ｍｍと 7ｍｍの穴を図 4.4.1 のように 2 箇所ずつボール盤にて加工する。詳細な寸法は図 4.4.2 に記載する。この穴に熱電対を固定し、温度を測定する。
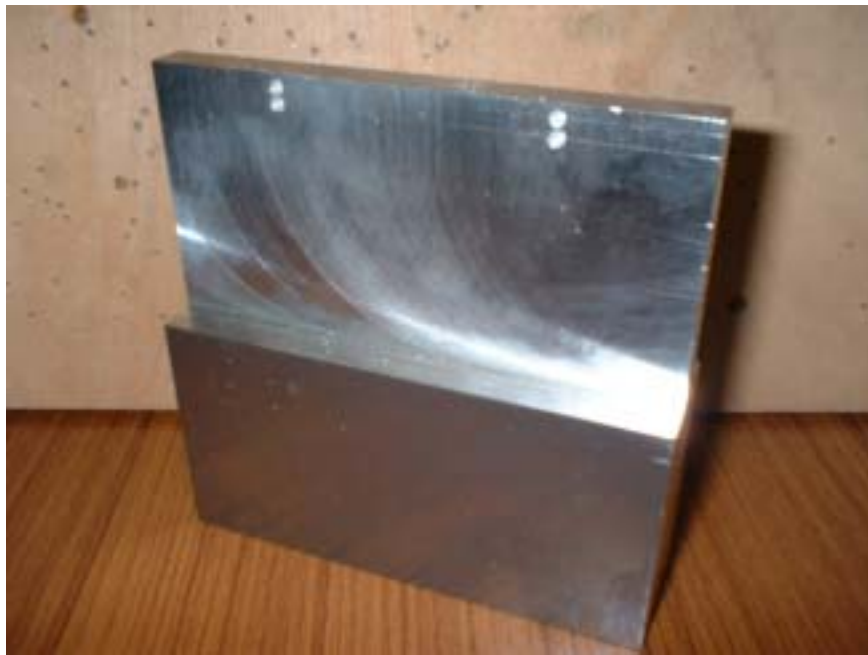
図 4.4.1　穴の開いた薄肉アルミ部材
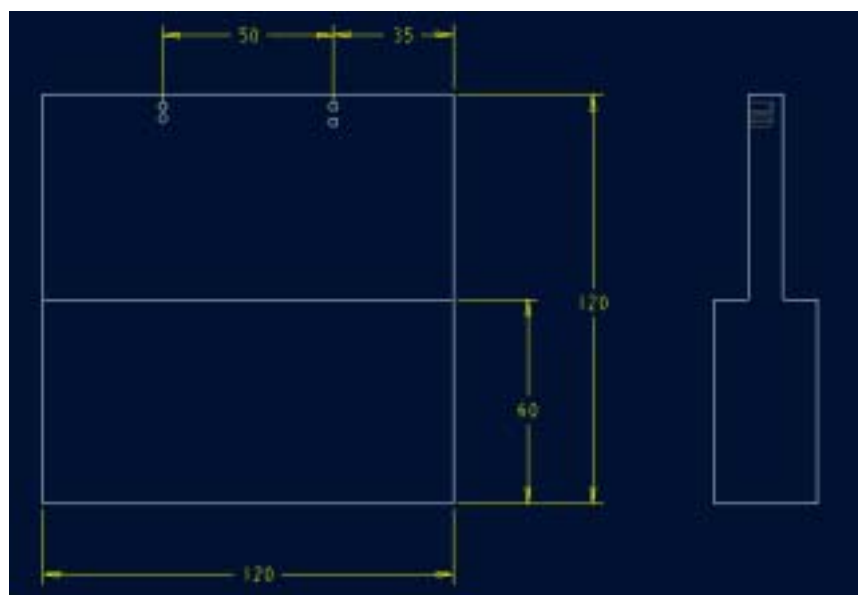
図 4.4.2　穴の開いた薄肉アルミ部材の寸法

第 5 章

実験

5.1 ストレインゲージによる歪み測定

図 4.2.1 及び図 4.2.2 のようにストレインゲージを固定した薄肉アルミ部材を、ストレインアンプに接続し、エンドミルにて幅２ｍｍほど削りデータを取る。そのときに使ったプログラムを記載する。

エンドミルによる切削プログラム

```
O0001;
G90　G54　F40;
G00　X-40.　Y22. ;
G43　Z200.　H02 ;
S2000　M03;
Z100. ;
G01　X160. ;
G91　G28　X0.　Y0.　Z0. ;
M30. ;
%
```
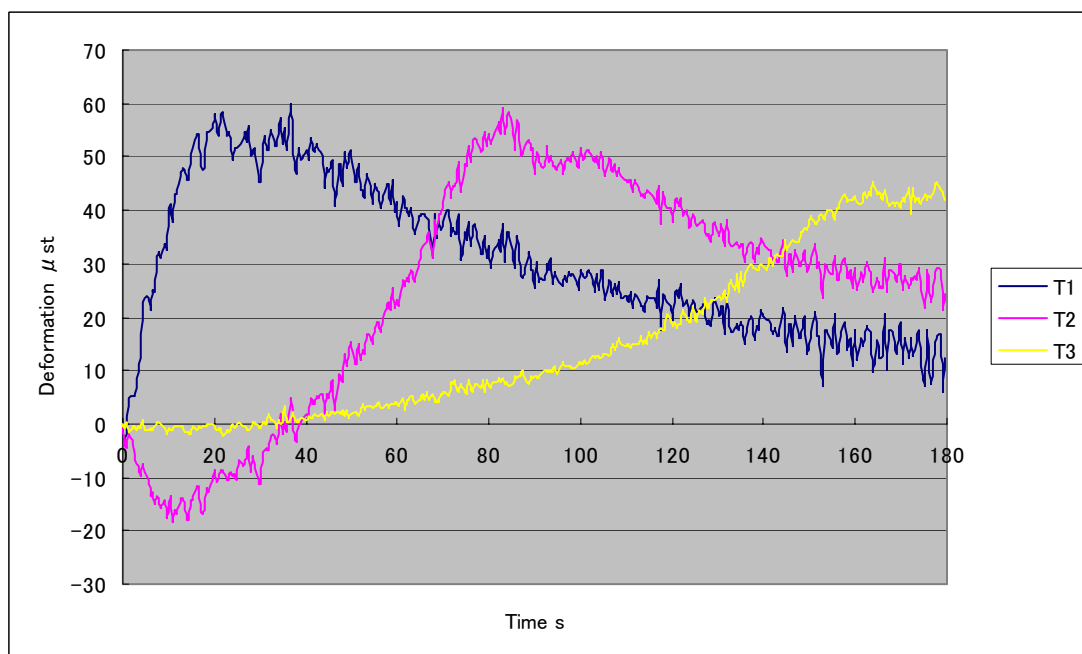
図 5.1.1　ストレインゲージ横３連
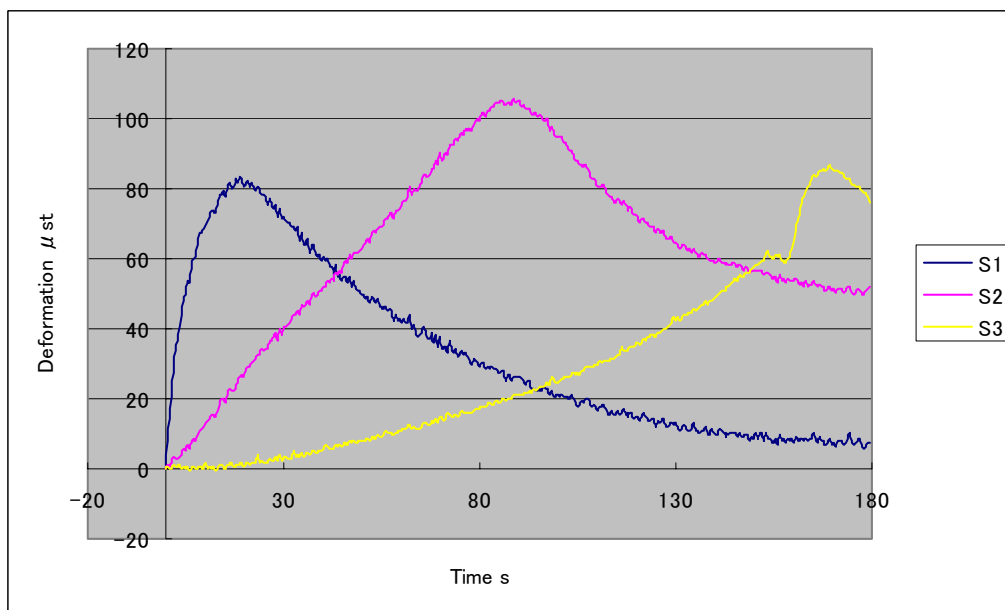
図 5.1.2　ストレインゲージ縦 3 連

図 5.1. 1 と図 5.1.2 の結果より図 5.1.3 の結果が導き出される。
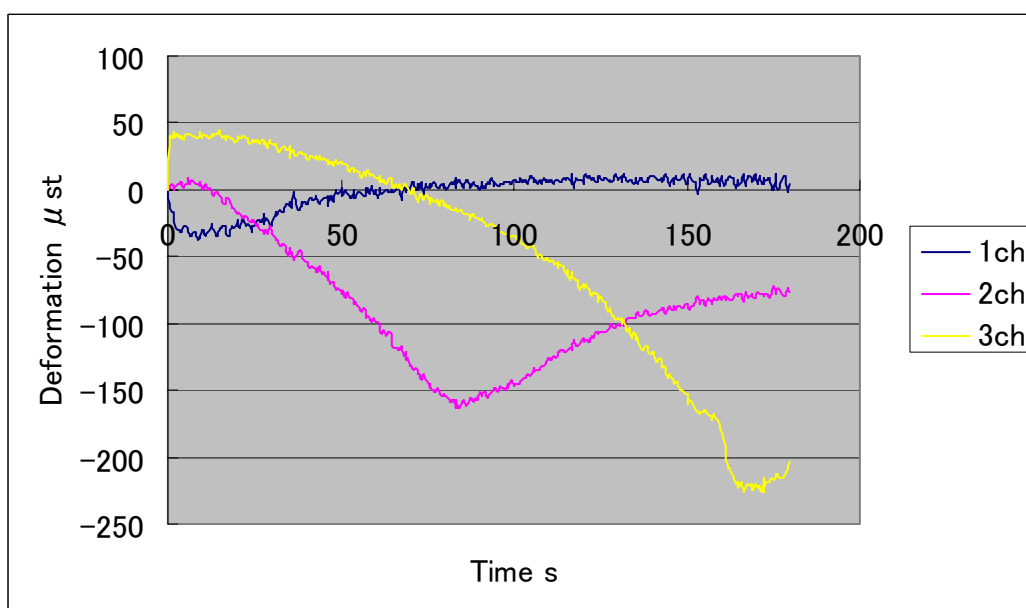
図 5.1.3　ストレインゲージによる歪み測定

1ch　10mm×5mm

2ch　60mm×5mm

3ch　110mm×5mm

図　5.1,3 より加工が終わるにつれて歪みが増大している。その理由として、摩擦熱が溜まり、その摩擦熱のエネルギーが増大していき始めの 1ch と最後の 3ch と比べると歪みが大幅に違うことがわかる。また 2ch についてはエンドミルが当たっている間は歪みが見られるが、エンドミルが 2ch から離れていくにつれて歪みが減っていく。つまり薄肉アルミ部材には切削加工している間ずっとエンドミルによる切削熱や切削力がかかり歪みを生じさせていることがわかる。

5.2 熱電対による温度測定

熱電対をデータロガーに接続し、図4.2の薄肉アルミ部材の穴に熱電対を固定して5.1で用いたプログラムで切削加工し、WEB　THERMO　1000にてデータを取る。
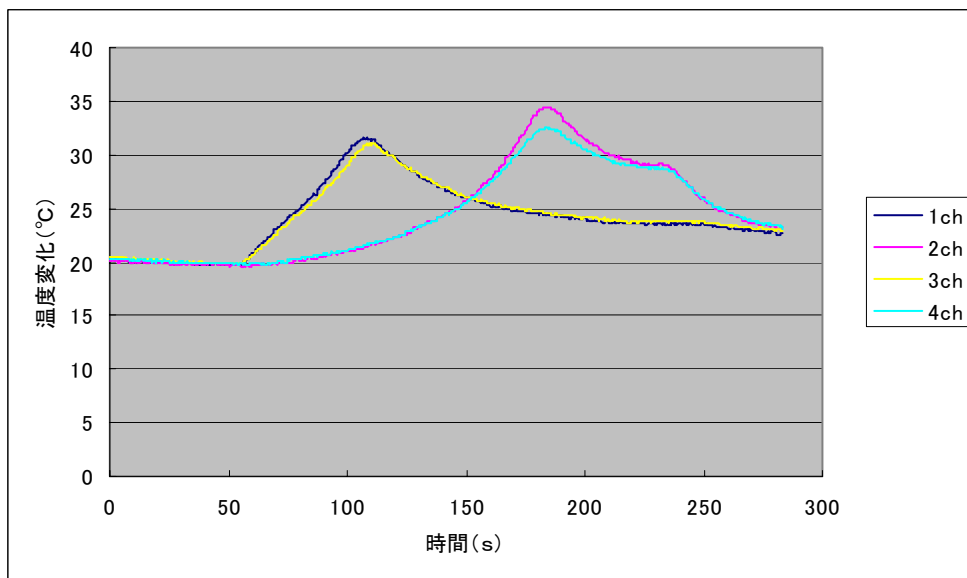
図 5.2 熱電対による温度測定

１ｃｈ：35mm×3.5mm×深さ 6mm
２ｃｈ：85mm×3.5mm×深さ７ｍｍ
３ｃｈ：35mm×7mm×深さ７mm
４ｃｈ：85mm×7mm×深さ 6mm

やはり穴が 6mm より 7mm の方が温度変化は顕著に現れた。また測定の後半部分が特に温度変化が激しかった。つまり薄肉アルミ部材には削っている間に切削熱がかなりかかることがわかった。

5.3 赤外放射温度計による温度測定

赤外放射温度計をデータロガーに接続し、図 4.2 の薄肉アルミ部材の穴に熱電対を固定して 5.1 で用いたプログラムで切削加工し、WEB　THERMO　1000 にてデータを取る。
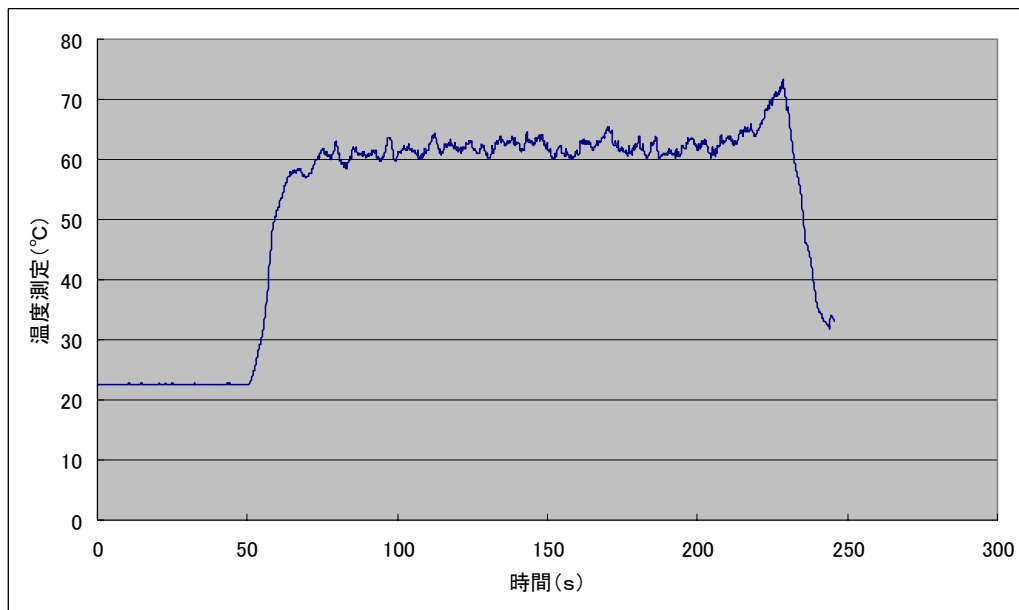
図 5.3　赤外放射温度計による温度測定

削り初めから温度変化は見られ、特に削り終わり付近での温度変化量はとても高い。削り終わりの部分で温度が高くなるのはアルミ部材の残りの加工する部分が薄く、そのため熱が伝わりやすく温度が上がったと思う。つまり薄肉アルミ部材には切削加工中は常時、切削熱がかかっていることになる。

第 6 章

考察

6.1　考察

　まずストレインゲージによる歪み測定について考えると

①ストレインゲージの数を増やして、加工されている場所の裏、以外にも固定して測定した方が、より詳細なデータが取れたと思われる。

②複数のストレインゲージを固定すると、ストレインゲージ同士が接近しすぎていたので取り付け箇所にも改良の余地があったと思われる。

　次に赤外放射温度計による温度測定について考えると

① 測定時、赤外放射温度計の前を切子が飛んでいたので、よりデータを正確なものにするために切子の飛んでこない場所に設置すべきであった。

② コラムに取り付けたので切削加工時の振動を受けていたので、この点も改良すべきだと思った。

　最後に熱電対による温度測定について考えると

①熱電対の数を増やした方がより詳細なデータが取れたと思われる。

②加工中の振動で熱電対が何度か外れたので、固定の方法を改善すべきだと思った。

第 7 章

結論

7.1 結論

今回の実験では短時間の加工であったが、歪みと温度変化が見られた。この短時間で熱、歪み、それぞれを測定したが、この測定には光、振動などさまざまな外乱が掛かってくる。それらを考えると今回の測定は一つの方法ではあるが、完全に熱変形が測定できたとはいえない。またその短時間で顕著に変化がみられたが、この実験を長時間してみると、もっと歪みと温度変化が発生することだろう。このことより熱変形補償が重要であることがわかる。

7.2　謝辞

　指導教員の長尾先生には、学部３年の時からご指導頂きまして、大変ありがとうございました。
院生の長尾さんには歪みゲージやアルミ部材の製作にご協力いただき、大変お世話になりました。おそらく長尾さんがいらっしゃらなければ本研究は終えることはできませんでした。どうもありがとうございました。
　共同研究でお世話になった学部の山田君とは、苦しみも喜びも分かち合うことができました。一緒に研究できたことをうれしく思います。ありがとうございました。

7.3　参考文献

〔１〕ひずみゲージによるひずみ測定入門　歴史から測定まで
　　高橋　賞、河井　正安　著　大成社

〔２〕OKK　大阪機工（株）　VM-4Ⅱ　使用説明書

〔３〕KEYENCE　赤外放射温度計　IT シリーズ　取扱説明書